

«Инженерная экология – 2015», (совместно со школой - семинаром молодых ученых). – Москва, 2015. – С. 125 – 127.

УДК 669.181.24

М. С. Ялунин, М. О. Золотых, А. Н. Дмитриев, Р. В. Алекторов,

Г.Ю. Витькина

ФГБУН «Институт металлургии Уральского отделения

Российской академии наук», г. Екатеринбург, Россия

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА MIDREX (НА ПРИМЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД)

**Аннотация.** *Оценены современное состояние и перспективы развития технологий прямого получения железа. Приведены теоретические аспекты процессов прямого восстановления железа. Разработаны алгоритмическое и программное обеспечение балансовой математической модели процесса металлизации в шахтной печи по технологии Midrex с учетом присутствия титана и ванадия в рудах. Проверена адекватность модели контрольным расчетом и проведена адаптация модели для титаномagnetитовых руд Качканарской группы месторождений.*

**Ключевые слова:** *титаномagnetит, окатыши, прямое получение железа, шахтная печь, Midrex, математическое моделирование.*

**Abstract.** *The current state and prospects for the development of direct iron production technologies are evaluated. The theoretical aspects of the processes of direct reduction of iron are presented. Algorithm and software for a balance mathematical model of the metallization process in a shaft furnace using the Midrex technology, taking into account the presence of titanium and vanadium in the ores, have been developed. The adequacy of the model was checked by the control calculation and the model was adapted for the titanomagnetite ores of the Kachkanarsky group of deposits.*

**Key words:** *titanomagnetite, pellets, direct production of iron, furnace, Midrex, mathematical modelling.*

Анализ современного состояния бескоксовой металлургии в мире, тенденций и перспектив ее развития показывает, что возможно дальнейшее увеличение производства металлизированного сырья, особенно в регионах, обладающих ресурсами дешевых энергоносителей. Основная часть (более 70 %) металлизированного продукта в мире производится по технологии Midrex (Мидрекс).

Шахтная печь в процессе Midrex работает по принципу противотока. Обоженные окатыши поступают в печь сверху и опускаются вниз под действием силы собственной тяжести по мере того, как в нижней части печи они выгружаются в виде металлизированного продукта. Одновременно горячий восстановительный газ, вдуваемый через фурмы, движется навстречу потоку окатышей вверх.

В настоящее время и на перспективу на Урале основной рудной базой черной металлургии России будет титаносодержащее сырье, имеющее в своем

составе, кроме железа, ванадий и титан. С каждым годом возрастает дефицит металлолома, необходимого в сталелитейной промышленности, т.е. остро стоит вопрос производства металлизированного продукта. Также развитие металлизации в шахтных печах важно в связи с перспективами развития АО «КГОК», в том числе с планами производства металлизированного продукта и его плавкой в дуговых сталеплавильных печах с получением пентоксида ванадия  $V_2O_5$ .

Вопросы разработки технологических основ рациональной схемы производства железа прямого получения из качканарских титаномагнетитов рассмотрены в работе [1]. Работы НИТУ «МИСиС», в частности [2], показали возможность извлечения  $V_2O_5$  при металлизации в процессе Midrex и плавке в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) титаномагнетитовых руд Качканарского месторождения. В работе [3] описан алгоритм математической модели процесса Midrex, разработанный профессором Н.С. Шумаковым, который лег в основу разрабатываемой математической модели.

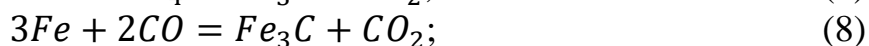
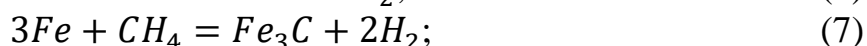
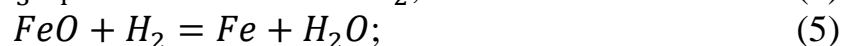
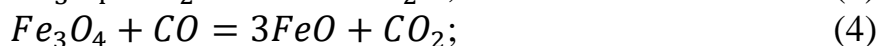
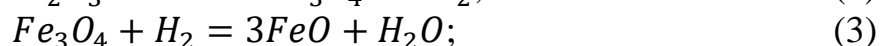
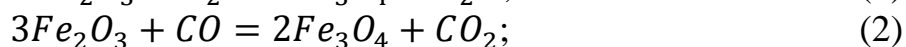
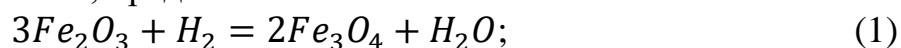
Мировое производство железа DRI на конец 2019 года достигло нового рекордного значения 108,1 млн т, что на 7,3 % выше, чем в 2018 году (см. таблицу 1). В России первая промышленная установка металлизации Мидрекс проектной мощностью 425 тыс. т/год металлизированных окатышей введена в эксплуатацию в конце 1983 г. на Оскольском электрометаллургическом комбинате (АО «ОЭМК им. А.А. Угарова»). Общая проектная мощность действующих установок по производству железа прямого получения в Российской Федерации составила 5,9 млн т/год, при этом фактическое производство в 2019 году достигло 8,03 млн т/год за счет модернизации существующих агрегатов и совершенствования текущих технологических процессов металлизации.

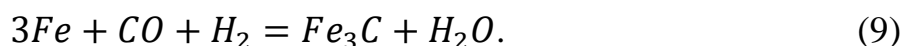
Таблица 1

Основные страны-производители железа DRI (данные 2019 г.)

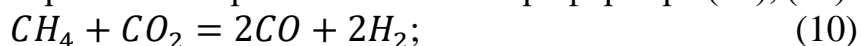
№	Страна	Производство DRI, млн т/год
1	Индия	33,74
2	Иран	28,52
3	Россия	8,03
4	Мексика	5,97
5	Саудовская Аравия	5,79

Основные химические реакции (1)-(9), протекающие при восстановлении оксидов железа в печи Midrex, представлены ниже:





Основные реакции конверсии газообразного топлива в риформере (10), (11):



Ниже указаны основные блоки схемы расчета:

1. Блок формирования исходных данных.
2. Блоки определения материальных и тепловых характеристик компонентов.
3. Блок учета характеристик окислительно-восстановительных реакций шихтовых материалов.
4. Расчет количества и состава восстановительного и колошникового газов.
5. Блоки определения выходных характеристик продуктов процесса.
6. Блоки расчета материального и теплового балансов.
7. Вывод результатов расчета.

Адекватность модели проверена контрольным расчетом на примере [3]. Интерфейс программы представлен на рисунке 1.

Расчет процесса металлизации титаномагнетитовых окатышей в шахтной печи проведен на примере данных работы [2] (пробы №№ 1-4). В качестве исходных данных использованы химические составы окатышей АО «КГОК», металлизированных с использованием процесса Midrex на АО «ОЭМК им. А.А. Угарова». Химический состав проб исходных и металлизированных титаномагнетитовых окатышей представлен в таблице 2. Степень металлизации принималась фактическая: для пробы № 1 – 92,10 %; 2 – 94,60 %; 3 – 93,40 %; 4 – 93,90 %.

ИМЕТ УрО РАН: Математическая модель процесса Midrex V: 1.0.7768.673 (Apr 8 2021)

Данные

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	
1.	Константы		
1.1.	Молярная масса Fe	г/моль	56
1.2.	Молярная масса O	г/моль	16
1.3.	Молярная масса C	г/моль	12
1.4.	Молярная масса H	г/моль	1
1.5.	Молярная масса N	г/моль	14
1.6.	Молярный объем газа при н.у.	л/моль	22,3999996185303
2.	Химический состав окисленных окатышей (% по массе)		
2.1.	Содержание Fe2O3	%	95,8000030517578
2.2.	Содержание FeO	%	0,850000023841858
2.3.	Общее содержание железа во всех формах (Feобщ)	%	67,7211074829102
2.4.	Содержание SiO2	%	2,59999990463257
2.5.	Содержание Al2O3	%	0,0700000002980232
2.6.	Содержание CaO	%	0,150000005960464
2.7.	Содержание MgO	%	0,0500000007450581
2.8.	Содержание MnO	%	0,0399999991059303
2.9.	Содержание P2O5	%	0,0199999995529652
2.10.	Содержание SO3	%	0,0199999995529652
2.11.	Содержание TiO2	%	0,200000002980232
2.12.	Содержание V2O5	%	0,200000002980232
2.13.	Общее содержание всех составляющих (контрольный расчёт)	%	100
3.	Химический состав металлизированных окатышей		
3.1.	Степень металлизации окатышей (пмет)	доля ед.	0,899999976158142
3.2.	Выход чистого железа из 100 кг окисленных окатышей	кг	60,9490013122559
3.3.	Выход FeO из 100 кг окисленных окатышей	кг	8,70699977874756
3.4.	Выход SiO2 из 100 кг окисленных окатышей	кг	2,59999990463257
3.5.	Выход Al2O3 из 100 кг окисленных окатышей	кг	0,0700000002980232
3.6.	Выход CaO из 100 кг окисленных окатышей	кг	0,150000005960464
3.7.	Выход MgO из 100 кг окисленных окатышей	кг	0,0500000007450581

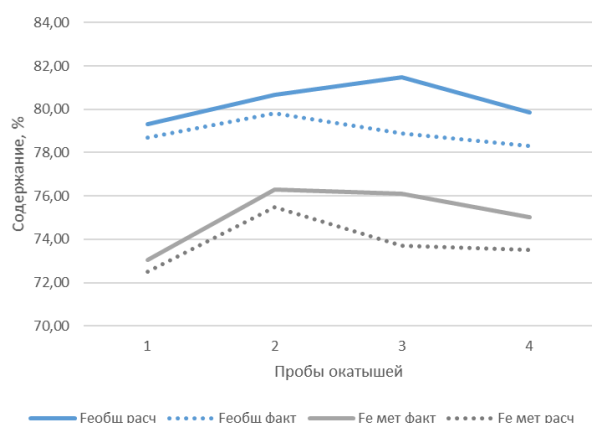
Готово

Рис. 1. Интерфейс программы расчета процесса металлизации Midrex

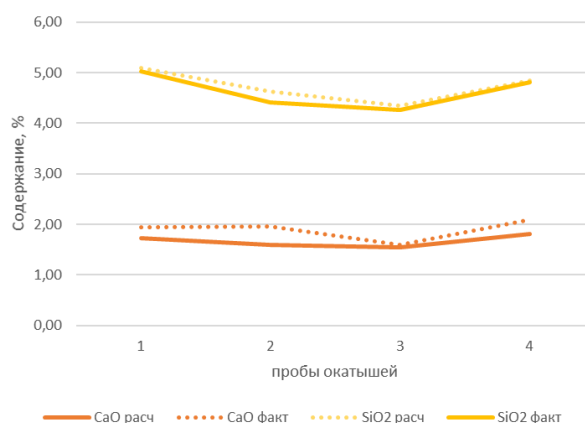
Таблица 2

Состав исходных, металлизированных (факт и расчет) окатышей

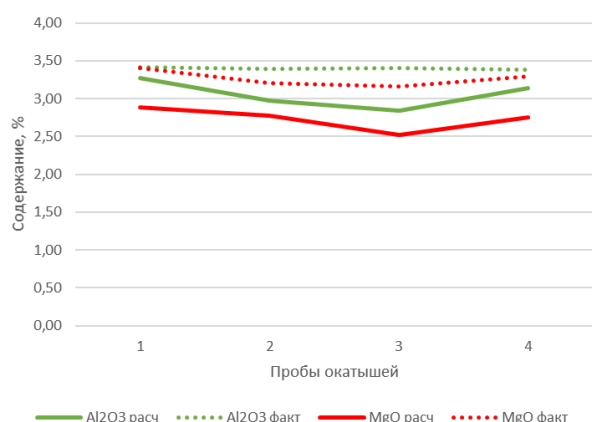
Проба	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	S	C
Исходные окатыши											
1	61,40	-	2,30	1,34	3,94	0,52	2,53	2,50	2,24	0,004	-
2	62,00	-	2,00	1,22	3,55	0,58	2,28	2,59	2,14	0,004	-
3	62,40	-	1,90	1,17	3,30	0,44	2,16	2,42	1,92	0,004	-
4	61,00	-	2,00	1,38	3,70	0,57	2,40	2,63	2,10	0,004	-
Металлизированные окатыши (факт)											
1	78,70	72,50	-	1,94	5,02	0,74	3,42	3,40	3,41	0,006	2,47
2	79,80	75,50	-	1,96	4,41	0,77	3,39	3,50	3,21	0,006	1,88
3	78,90	73,70	-	1,60	4,27	0,77	3,40	3,58	3,16	0,004	3,45
4	78,30	73,50	-	2,09	4,81	0,76	3,38	3,66	3,29	0,005	3,08
Металлизированные окатыши (расчет)											
1	79,32	73,05	-	1,73	5,09	0,67	3,27	3,23	2,89	0,005	2,47
2	80,67	76,31	-	1,59	4,62	0,75	2,97	3,37	2,78	0,005	1,88
3	81,47	76,09	-	1,54	4,34	0,58	2,84	3,18	2,52	0,005	3,45
4	79,87	75,00	-	1,81	4,84	0,75	3,14	3,34	2,75	0,005	3,08



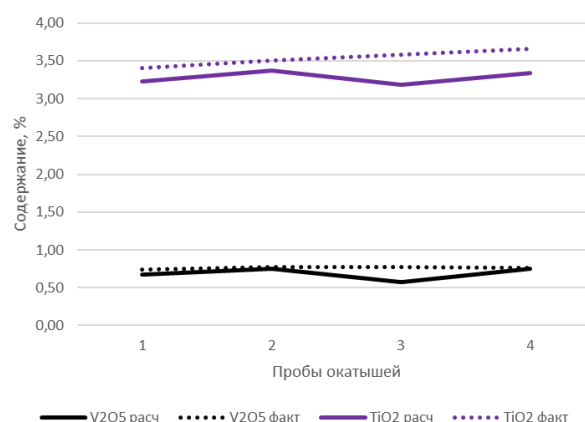
а



б



в



г

1 – Fe<sub>общ</sub>, Fe<sub>мет</sub>; 2 – CaO, SiO<sub>2</sub>; 3 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO; 4 – V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>.

Рис. 2. Сравнение расчетных и фактических значений химических составов металлизированных окатышей

Допущения: в процессе металлизации восстановление фосфора, кремния, марганца и серы не происходит, вынос пыли отсутствует. Степень использования СО равна 36,36 %; состав восстановительного газа:  $\text{CO}_2$  – 2,5%;  $\text{H}_2$  – 57,4 %;  $\text{CO}$  – 36,4 %;  $\text{N}_2$  – 2,3 %;  $\text{CH}_4$  – 1,4 %. Результаты сравнения фактических и расчетных данных химических составов приведены на рисунке 2, а-г. Относительная погрешность результатов представлена в таблице 3. Неудовлетворительная сходимост некоторых компонентов химического состава металлизированных окатышей требует уточнения математического описания и уменьшения количества допущений.

Таблица 3

Относительная погрешность результатов расчетов, %

Проба	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	$\text{Fe}_{\text{мет}}$	$\text{CaO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$
1	-0,78	-0,75	12,14	-1,38	10,45	4,59	5,26	17,99
2	-1,08	-1,06	23,27	-4,55	2,67	14,14	3,86	15,47
3	-3,15	-3,14	3,90	-1,61	32,76	19,72	12,58	25,40
4	-1,97	-2,00	15,47	-0,62	1,33	7,64	9,58	19,64

Таким образом, проведен аналитический обзор процесса металлизации железорудных материалов Midrex на современном этапе. Описан алгоритм и блок-схема расчета технико-экономических показателей процесса металлизации для шахтной печи процесса Midrex. Разработана методика расчета материального и теплового баланса процесса Midrex с учетом использования в шихту железорудного сырья, содержащего ванадий и титан.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

### Список использованных источников

1. Рыбкин В.С. Разработка технологических основ рациональной схемы производства железа прямого получения из качканарских титаномагнетитов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2008. – 131 с.
2. Лазуткин С.С. Исследование и разработка новой технологии переработки окатышей Качканарского ГОКа. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МИСиС, 2000. – 158 с.
3. Шумаков Н.С. Технологические расчеты процессов пирометаллургической переработки руд / Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, А.В. Малыгин, С.Г. Майзель. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. – 90 с.